

УСТАЛОСТНАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА, ОБРАБОТАННОГО ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Ю.Ф. Иванов¹), Е.А. Петрикова¹), С.В. Коновалов²),
К.В. Алсараева²), А.Д. Тересов¹), В.Е. Громов²)

¹Институт сильноточной электроники СО РАН,

пр. Академический, 2/3, Томск, 634055, Россия, yufi55@mail.ru

²Сибирский государственный индустриальный университет,
ул. Кирова, 42, Новокузнецк, 654007, Россия, gromov@physics.sibsiu.ru

Выполнены усталостные испытания силумина эвтектического состава, облученного интенсивным импульсным электронным пучком. Выявлен режим облучения, позволяющий повысить усталостную долговечность силумина более чем в 2,5 раза. Выполнены исследования структуры и фазового состава и выявлены физические механизмы, ответственные за увеличение усталостной долговечности материала.

Введение

Усталостное разрушение металлов и сплавов является весьма распространенным явлением, возникающим при действии переменных или повторных нагрузок. Процесс разрушения, как правило, начинается с появления микроскопических трещин, которые, быстро развиваясь, приводят к полному разрушению детали. Усталостные трещины зарождаются в зоне действия концентраторов напряжений, которыми могут являться включения второй фазы, микропоры, царапины и выбоины на поверхности детали. Устранение концентраторов напряжений приводит к существенному увеличению ресурса эксплуатации детали и агрегата в целом [1].

Одним из перспективных методов увеличения усталостной долговечности детали является обработка ее поверхности высокоинтенсивным импульсным электронным пучком: существенно повышается энергия зарождения в поверхностном слое концентраторов напряжения [2].

Целью настоящей работы является анализ эволюции структуры силумина, обработанного высокоинтенсивным импульсным электронным пучком, при усталостных испытаниях.

Материал и методика исследования

Усталостным испытаниям подвергали силумин марки АК12 по схеме циклического несимметричного консольного изгиба [3]. Образцы имели форму параллелепипеда с размерами 8x14x145 мм. Имитация трещины осуществлялась надрезом в виде полукруглости радиуса 10 мм. Температура испытаний 300 К, частота нагружения образцов изгибом составляла 15 с⁻¹ при нагрузке 10 МПа. Облучение поверхности образцов, приготовленных к усталостным испытаниям, осуществляли на установке «СОЛО» [2] при следующих параметрах: энергия электронов 16 кэВ; частота следования импульсов 0.3 с⁻¹; длительность импульса пучка электронов 150 мкс; плотность энергии пучка электронов $E_s = (10-25)$ Дж/см² количество импульсов воздействия 1 - 5. Облучали лицевую поверхность образцов, т.е. поверхность, находящуюся над надрезом, имитирующим трещину. Исследования поверхности

разрушения осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии (прибор LEO EVO 50), дефектную структуру разрушенных образцов анализировали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг (прибор JEM-2100, JEOL). Фольги готовили методом ионного утонения (прибор Ion Slicer) из пластинок, вырезанных параллельно поверхности излома на минимально возможном расстоянии от поверхности разрушения.

Результаты исследования и их обсуждение

Выполнена обработка поверхности силумина интенсивным импульсным электронным пучком. Осуществлены усталостные испытания образцов в исходном состоянии и после электронно-пучковой обработки. Выявлен режим облучения, позволивший увеличить усталостную долговечность силумина более чем в 2.5 раза.

Выполнены исследования и установлено, что характерной особенностью исходного силумина является наличие большого количества кристаллитов кремния преимущественно пластинчатой формы (рис. 1, а). Пластины располагаются хаотически, либо декорируют границы зерен сплава. Размеры пластин в плоскости шлифа изменяются в пределах от единиц до десятков микрометров.

Структура, формирующаяся в поверхностном слое силумина при облучении интенсивным электронным пучком по режиму 20 Дж/см²; 150 мкс; 5 имп. (режим максимальной усталостной долговечности), по морфологическому признаку кардинально отличается от структуры исходного образца и образца, облученного по режиму минимальной усталостной долговечности (15 Дж/см²; 150 мкс; 3 имп.) (рис. 1). На поверхности облучения формируется однородная структура зеренного (ячеистого) типа (размер зерен эвтектики изменяется в пределах 30-50 мкм) (рис. 1, в). На границах зерен располагаются глобулярные включения кремния, поперечные размеры которых не превышают 20 мкм.

Облучение силумина электронным пучком с параметрами (15 Дж/см²; 150 мкс; 0.3 с⁻¹; 1 имп.) приводит к частичному оплавлению пластин

кремния, расположенных в поверхностном слое; вокруг пластин формируются микропоры (рис. 1, б). При усталостных испытаниях пластины кремния являются концентраторами напряжений, способствуя преждевременному разрушению материала.

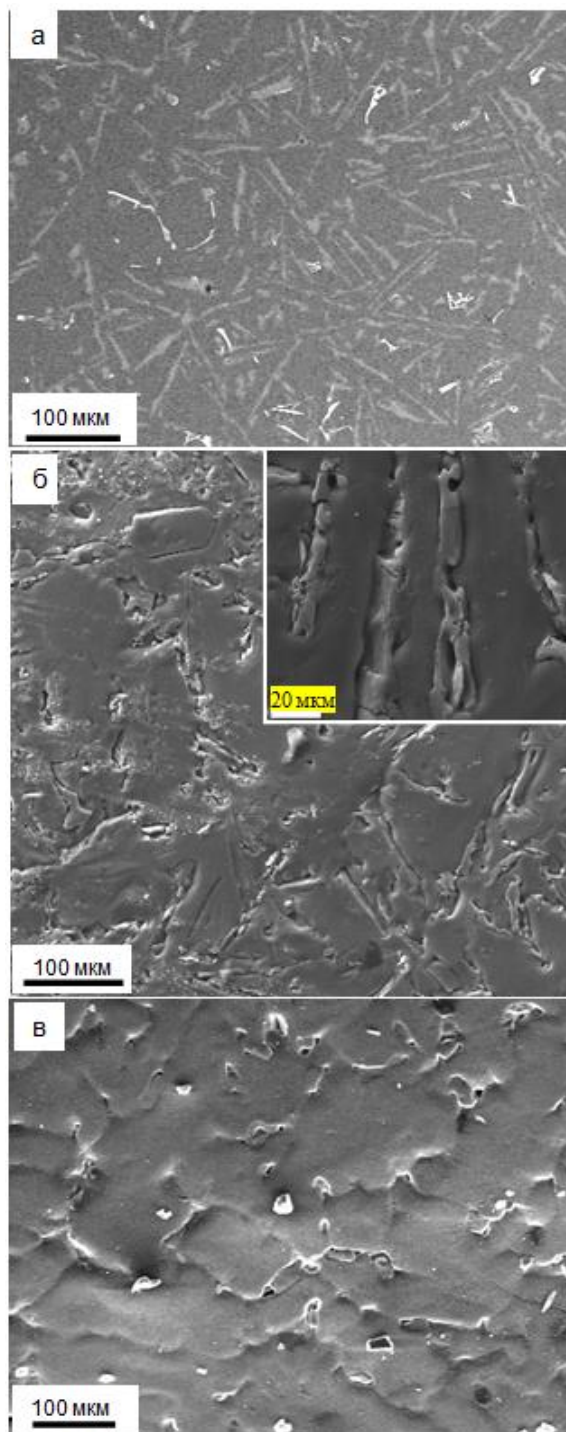


Рис. 1. Структура поверхности силумина в исходном состоянии (а) и после облучения электронным пучком с параметрами б - 15 Дж/см²; 150 мкс; 1 имп.; в - 20 Дж/см²; 150 мкс; 5 имп.

Плавление поверхностного слоя силумина электронным пучком и последующая скоростная кристаллизация приводят к формированию эвтек-

тики, имеющей столбчатое строение (рис. 2). Столбики кристаллизации имеют ячеистое строение (рис. 2). Средние размеры ячеек 450 нм. Ячейки разделены прослойками кремния, поперечные размеры прослоек кремния 80 нм.

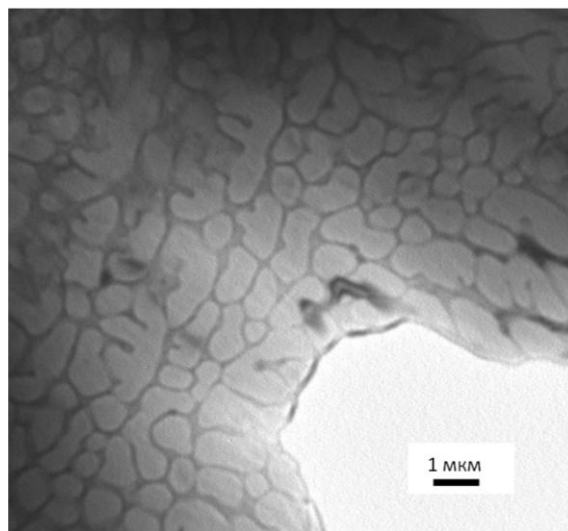


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры силумина, обработанного интенсивным импульсным электронным пучком.

Усталостные испытания при числе циклов нагружения 72500 не приводят к разрушению структуры столбчатой (ячеистой) кристаллизации. Однако существенным образом преобразуется структура прослоек кремния. А именно, прослойки кремния разбиваются на отдельно расположенные частицы, размеры которых изменяются в пределах (15-30) нм.

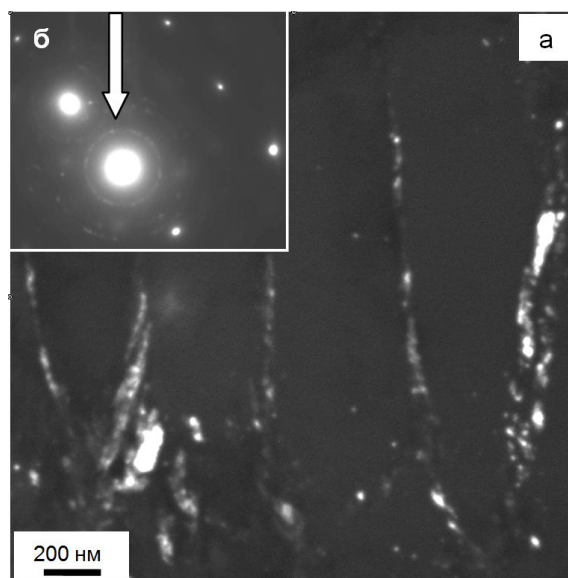


Рис. 3. Темнопольное изображение (а), полученное в рефлексе [111] Si, б – микроэлектроннограмма, стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле. Количество циклов нагружения 72500.

После 574000 циклов нагружения в поверхностном слое формируется структура, лишь отдаленно напоминающая структуру высокоскоростной ячеистой кристаллизации. Во-первых, в 2-3

раза увеличивается толщина прослоек, разделяющих ячейки алюминия (рис. 4а).

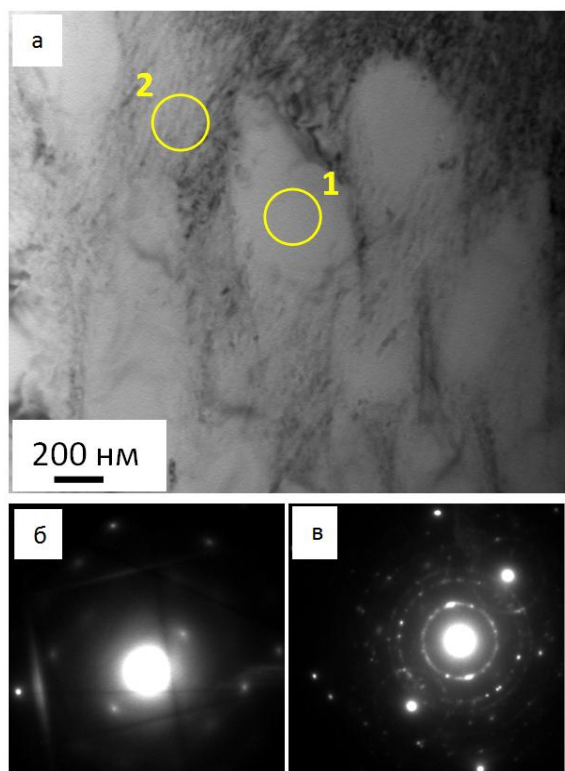


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры силумина, обработанного интенсивным импульсным электронным пучком (20 Дж/см^2 ; 150 мкс ; 0.3 с^{-1} ; 5 имп.); а – светлое поле; б, в – микроэлектроннограммы, полученные с участков 1 и 2, соответственно. Количество циклов до разрушения 574000.

Во-вторых, микроэлектроннограммы, полученные с прослоек, приобретают ярко выраженный кольцевой характер (рис. 4в); полученные с объема ячеек, остаются точечными (рис. 4б). В-третьих, прослойки разбиваются на разориентированные полосы (рис. 4а). В объеме полос выявляется наноразмерная субструктура.

Закключение

Осуществлено модифицирование поверхности образцов эвтектического силумина высокоинтенсивным импульсным электронным пучком, выполнены усталостные испытания и выявлен режим облучения, позволивший повысить усталостную долговечность материала в 2.5-3 раза. Показано, что основной причиной увеличения усталостной долговечности силумина является диспергирование и квазиоднородное распределение кристаллов кремния в модифицированном слое. Выявлено формирование в поверхностном слое структуры ячеистой (столбчатой) кристаллизации (средний размер ячеек 450 нм). Показано, что ячейки разделены прослойками кремния толщиной 80 нм . Установлено, что многоциклового усталостные испытания силумина, подвергнутого облучению высокоинтенсивным импульсным электронным пучком, приводят к преобразованию структуры ячеистой кристаллизации, заключающемуся в разрушении прослоек кремния и формировании протяженных (толщиной до 250 нм) двухфазных слоев, оконтуривающих ячейки алюминия и содержащих наноразмерные (до 10 нм) частицы кремния. Выявлено, что источниками усталостных микротрещин являются исключительно пластины кремния микронных и субмикронных размеров, не растворившиеся при электронно-пучковой обработке.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00091)

Список литературы

1. Коцаньда С. Усталостное разрушение металлов. М.: Металлургия, 1976. 456 с.
2. Ласковнев А.П., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А. и др. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой Минск: «Белорусская наука», 2013. 287 с.
3. Соснина О.В., Громова В.Е., Козлова Э.В., Иванов Ю.Ф. и др. Усталость сталей при импульсном токовом воздействии. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2004. 464 с.

FATIGUE DURABILITY OF THE EUTECTIC SILYMIN PROCESSED BY THE HIGH-INTENSITY PULSE ELECTRON BEAM

Yu.F. Ivanov¹), E.A. Petrikova¹), C.V. Konovalov²), K.V. Alsaraeva²), A.D. Teresov¹), V.E. Gromov²)

¹Institute of High Current Electronics SB RAS,

Akademicheskoy Avenue, 2/3, Tomsk, 634055, Russia, yufi55@mail.ru

²Sibirian State Industrial University,

42 Kirov St., Novokuznetsk, 654007, Russia, gromov@physics.sibsiu.ru

Fatigue tests are carried out and the radiation mode which allowed to increase fatigue durability of material in 2,5 ... 3 times is revealed. It is shown that dispersing and quasihomogeneous distribution of crystals of silicon in the modified layer is the main reason for increase in fatigue durability of silymin. Formation in a blanket of structure of cellular (column) crystallization (the average size of cells of 450 nanometers) is revealed. It is shown that cells are divided by silicon 80 nanometers thick layers. It is established that multi-cycle fatigue tests of the silymin subjected to radiation by a high-intensity pulse electron beam lead to the transformation of structure of cellular crystallization consisting in destruction of layers of silicon and formation of the extended two-phase layers (up to 250 nanometers thick) delineating cells of aluminum and containing nanodimensional (to 10 nanometers) silicon particles. It is revealed that sources of fatigue microcracks are only the plates of silicon of the micron and submicrons sizes which aren't dissolved at an electronic beams to processing.